

# بررسی اثر ترکیبی نانوسیلیس، میکروالیاف فولادی و پلی پروپیلن در مشخصات مکانیکی، نفوذپذیری و تهاجم کلریدی کامپوزیت سیمانی

صفا پیمان\* (استادیار)

گروه مهندسی عمران، دانشگاه جامع امام حسین (ع)، تهران

مهندسی عمران شریف، تابستان ۱۴۰۳  
دوری ۴۰، شماره ۲، صص. ۱۲۷-۱۳۸، (پژوهشی)

در پژوهش حاضر، اثر توأمان نانوسیلیس، میکروالیاف فولادی و پلی پروپیلن در مشخصات مکانیکی، نفوذپذیری و تهاجم کلریدی کامپوزیت سیمانی بررسی شده است. لذا از ۲٪ وزنی نانوسیلیس به عنوان جایگزین سیمان و به ترتیب ۱ و ۲ درصد حجمی از الیاف فولادی و پلی پروپیلن به عنوان افزودنی در کامپوزیت سیمانی به صورت مجزا و همچنین به صورت توأمان استفاده شده است. آزمایش هایی همچون: مقاومت های فشاری، خمشی و کششی، سرعت پالس فراصوت، نرخ جذب آب مویینه و مهاجرت تسریع شده یون کلرید (RCMT) بررسی شده است. نتایج حاکی از آن است که حضور هم زمان نانوسیلیس، میکروالیاف فولادی و پلی پروپیلن در طرح مخلوط کامپوزیت سیمانی ۹۰ روزه به ترتیب منجر به افزایش ۵۹/۳، ۳۲/۳، ۶۷/۲ و ۲۵/۹ درصدی مقاومت های فشاری، خمشی و کششی و چقرمگی خمشی در مقایسه با نمونه ی شاهد شده است. کاهش نرخ جذب آب و افزایش دوام در برابر تهاجم کلریدی از دیگر نتایج قابل توجه پژوهش حاضر بوده است.

واژگان کلیدی: نانوسیلیس، الیاف فولادی، الیاف پلی پروپیلن، مشخصات مکانیکی، دوام.

speyman@ihu.ac.ir

## ۱. مقدمه

گرفته است.<sup>[۵]</sup> اخیراً استفاده از نانوذرات در مواد پایه ی سیمانی توجه زیادی را به خود جلب کرده است، زیرا آن ها می توانند در مقیاس نانو برخی خواص منحصر به فرد را ایجاد کنند.<sup>[۶]</sup> با توجه به ساختار هیدراته ی سیمان با منافذ نانومقیاس، نانوذرات می توانند به طور مؤثر منافذ با سایز نانو را پر کنند و استحکام و دوام بتن را افزایش دهند.<sup>[۷]</sup> از سویی دیگر، نانوذرات به عنوان کانون های هسته زایی می توانند منجر به تسریع واکنش هیدراسیون سیمان شوند. متعاقباً محصولات حاصل از واکنش هیدراسیون به ایجاد ریزساختار متراکم تر و تخلخل کمتر ماتریس سیمانی کمک می کنند.<sup>[۸]</sup>

سیلیس دارای فرمول شیمیایی سیلیکون دی اکسید ( $\text{SiO}_2$ ) است. نانوسیلیس به نانوذره یی اطلاق می شود که با کاهش اندازه ی ذرات پودر سیلیس از طریق تعدادی از فرایندهای مختلف به سطح نانومتری تولید می شود. نانوسیلیس می تواند به عنوان افزودنی برای بهبود خواص مکانیکی و دوام کامپوزیت های سیمانی استفاده شود.<sup>[۹]</sup> در همین راستا، چیترا<sup>۱</sup> و همکاران (۲۰۱۶)،<sup>[۱۱]</sup> تأثیر افزودن نانوسیلیس کلوتیدی در خواص مکانیکی و دوام بتن پرمقاومت را بررسی کردند و دریافتند که جایگزینی

بتن ماده یی ساختمانی است که از مخلوط کردن سیمان پرتلند با ماسه، سنگ دانه ی خرد شده و آب ساخته می شود، که به طور گسترده در صنعت ساخت استفاده می شود.<sup>[۱]</sup> مقرون به صرفه بودن، در دسترس بودن منابع فراوان اجزاء بتن، سازگاری با محیط زیست و مقاومت مناسب از جمله ویژگی هایی هستند که سبب استفاده ی مطلوب آن شده است.<sup>[۲]</sup> در طراحی سازه های بتنی، علاوه بر داشتن مقاومت مکانیکی بالا، دوام بتن نیز به عنوان یک مشخصه ی حیاتی باید در نظر گرفته شود. بتن بادوام باید در برابر هرگونه فرایند شیمیایی، فیزیکی، یا بیولوژیکی که در طول عمر خدماتی سازه ممکن است به آن آسیب رساند، مقاومت کند.<sup>[۳]</sup>

فناوری نانو، رویکردی جدید است که در زمینه های مختلف دانش و فناوری وارد شده است. لذا مطالعات گسترده یی در راستای افزایش عملکرد مصالح ساختمانی و توسعه ی بتن های بادوام و پایدار برای صنعت ساخت با به کارگیری فناوری نانو صورت

\* نویسنده مسئول

تاریخ: دریافت ۱۴۰۲/۵/۲۹، اصلاحیه ۱۴۰۲/۹/۳، پذیرش ۱۴۰۲/۹/۱۳.

استناد به این مقاله:

پیمان، صفا. ۱۴۰۳. بررسی اثر ترکیبی نانوسیلیس، میکروالیاف فولادی و پلی پروپیلن در مشخصات مکانیکی، نفوذپذیری و تهاجم کلریدی کامپوزیت سیمانی. مهندسی عمران

شریف، ۴۰(۲)، صص. ۱۲۷-۱۳۸. DOI:10.24200/J30.2023.62861.3245

جزئی سیمان با نانوسیلیس در بتن بر مقاومت نه فقط منجر به افزایش مقاومت های فشاری، خمشی و کششی می شود، بلکه دوام در برابر نفوذ یون کلرید را نیز بهبود می بخشد.

میکروالیاف فولادی، یک نوع مسلح کننده ی فلزی است؛ که ویژگی هایی از جمله: طول کوتاه، نسبت ابعادی (نسبت طول به قطر) حدود ۲۰ تا ۱۰۰ و سطح مقطع های مختلف دارند. این تذکر لازم است که الیاف فولادی به اندازه ی کافی کوچک هستند، لذا امکان پخش شدگی کاملاً تصادفی آن ها در یک ماتریس سیمانی فراهم است. نکته ی قابل توجه در مورد الیاف فولادی این است که مصرف مقدار معینی از آن ها در بتن می تواند باعث تغییرات کیفی در خصوصیات فیزیکی بتن شود و مقاومت در برابر ترک خوردگی، ضربه، خستگی، خمش، دوام و سایر خواص را به شکل قابل توجهی افزایش دهد.<sup>[۱۲]</sup> یازچی<sup>۲</sup> و همکاران (۲۰۰۷)،<sup>[۱۳]</sup> نشان دادند که استفاده از الیاف فولادی با نسبت ابعادی و درصدهای افزودنی مختلف در بتن، منجر به افزایش حدود ۴ تا ۱۹ درصدی مقاومت فشاری، حدود ۱۱ تا ۵۴ درصدی مقاومت کششی و حدود ۳ تا ۸۱ درصدی مقاومت خمشی می شود. همچنین در پژوهشی دیگر توسط بهفرنیا و بهروان (۲۰۱۴)،<sup>[۱۴]</sup> تأثیر الیاف فولادی در مقاومت در برابر نفوذ کلرید بتن بررسی و گزارش شده است، که عمق نفوذ در نمونه های تقویت شده با الیاف فولادی نسبت به نمونه ی شاهد، ۱۵٪ کاهش یافته است.

از سویی دیگر، میکروالیاف پلی پروپیلن، نوعی الیاف پلیمری است که متشکل از رشته های بسیار نازک تک رشته یی است، که باعث ایجاد یک سیستم بتن مسلح با کارایی مناسب و کیفیت بسیار بالا می شود. میکروالیاف پلی پروپیلن به دلیل مشخصات بارزی، مانند: شکل پذیری و انعطاف پذیری بالا، دوام مناسب و قیمت ارزان، به صورت گسترده در حوزه ی کامپوزیت سیمانی استفاده می شود.<sup>[۱۵]</sup> وانگ<sup>۳</sup> و همکاران (۲۰۱۹)،<sup>[۱۶]</sup> در پژوهشی تأثیر الیاف پلی پروپیلن در مشخصات مکانیکی بتن لاستیکی را بررسی کردند و دریافتند که خصوصیات مکانیکی بتن لاستیکی حاوی الیاف پلی پروپیلن، شامل مقاومت های کششی و خمشی بهبود یافته است. از طرفی، تأثیر الیاف پلی پروپیلن در مقاومت در برابر نفوذ کلرید بتن توسط بسیاری از پژوهشگران بررسی شده است. نتایج آزمایش برخی از ایشان،<sup>[۱۸،۱۷]</sup> نشان داده است که افزودن الیاف پلی پروپیلن در بتن منجر به افزایش مقاومت بتن در برابر نفوذ کلرید می شود، در حالی که سایر پژوهشگران،<sup>[۱۹،۱۵]</sup> نتایج متناقضی را گزارش کرده اند، که حاکی از کاهش مقاومت در برابر نفوذ کلرید بتن حاوی الیاف پلی پروپیلن است.

بنابراین با مروری بر ادبیات موضوع مشخص شد که نانوسیلیس و همچنین میکروالیاف فولادی و پلی پروپیلن، پتانسیل های ویژه یی در راستای بهبود مشخصات خاصی از کامپوزیت های سیمانی دارند. با وجود این، هر کدام از مواد مذکور به دلیل ویژگی های ذاتی می توانند فقط در برخی از خصوصیات کامپوزیت های سیمانی تأثیرگذاری قابل توجهی داشته باشند؛ در حالی که استفاده ی توأمان آن ها می تواند چندین ویژگی کامپوزیت های سیمانی را به صورت هم زمان ارتقاء بخشد. همچنین، بررسی پژوهشگران نوشتار حاضر، حاکی از نبود پژوهشی جامع و مدون درخصوص تأثیر توأمان نانوسیلیس، میکروالیاف فولادی و پلی پروپیلن در خصوصیات مختلف کامپوزیت سیمانی بوده است. لذا در پژوهش حاضر، هدف بررسی اثر توأمان نانوسیلیس، میکروالیاف فولادی و پلی پروپیلن در مشخصات مکانیکی، نفوذ پذیری و تهاجم کلریدی کامپوزیت سیمانی بوده است؛ تا از این طریق چند ویژگی عملکردی کامپوزیت های سیمانی به صورت هم زمان ارتقاء داده شود.

## ۲. برنامه ی آزمایشگاهی

### ۲.۱. مصالح مصرفی

در پژوهش حاضر، از سیمان تیپ II تهران با سطح ویژه  $0.34 \text{ (m}^2/\text{gr)}$  و وزن مخصوص  $3.12 \text{ (gr/cm}^3)$  استفاده شده است. ترکیب های شیمیایی سیمان مصرفی در پژوهش حاضر در جدول ۱ ارائه شده است. ماسه ی سیلیسی طبیعی با وزن مخصوص  $2.65 \text{ (gr/cm}^3)$  و مدول نرمی ۲/۴۹ به عنوان ریزدانه استفاده شد؛ که الزامات دانه بندی آن مطابق با استاندارد ASTM C۷۷۸<sup>[۲۰]</sup> بوده است. نانوسیلیس استفاده شده در پژوهش حاضر، محصول شرکت صنایع نانوسیلیس ایساتیس بوده است، که مشخصات آن در جدول ۲ ارائه شده است. همچنین از میکروالیاف فولادی و پلی پروپیلن مطابق با مشخصات ارائه شده در جدول ۳ استفاده شده است، که تصاویر ظاهری آن ها در شکل ۱ مشاهده می شود. این تذکر لازم است که به منظور دست یابی به کارایی مورد نظر در کامپوزیت سیمانی و همین طور به عنوان یک ماده ی سطح پرداز جهت پخش شدگی مناسب نانوسیلیس در ملات سیمانی، از فوق روان کننده ی پلی کربوکسیلات اتر محصول شرکت وندشیمی، مطابق با رده بندی F براساس استاندارد ASTM C۴۹۴/C۴۹۴M<sup>[۲۱]</sup> استفاده شده است. علاوه بر این، آب شرب شهری با مقدار pH برابر با ۶/۹ استفاده شده است.

### ۲.۲. روش ساخت سوسپانسیون حاوی نانوسیلیس

به منظور ساخت سوسپانسیون حاوی نانوسیلیس، ابتدا به اندازه ی مورد نیاز آب، نانوسیلیس و فوق روان کننده ی پلی کربوکسیلات اتر توزین و در بشر ریخته شده و سپس بشر در دستگاه مافوق صوت پروبی<sup>۴</sup> قرار گرفته و با انتخاب توان ۲۰۰ وات

جدول ۱. ترکیب های شیمیایی سیمان پرتلند تیپ II.

ترکیب های شیمیایی	درصد وزنی
CaO	۶۳/۰۱
SiO <sub>۲</sub>	۱۹/۴۲
SO <sub>۳</sub>	۶/۷۸
Al <sub>۲</sub> O <sub>۳</sub>	۳/۶۳
Fe <sub>۲</sub> O <sub>۳</sub>	۳/۲۳
MgO	۲/۷۰
K <sub>۲</sub> O	۰/۷۱
TiO <sub>۲</sub>	۰/۲۹
MnO	۰/۱۹

جدول ۲. ویژگی های نانوسیلیس مصرفی.

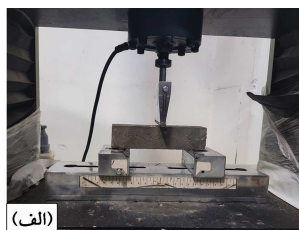
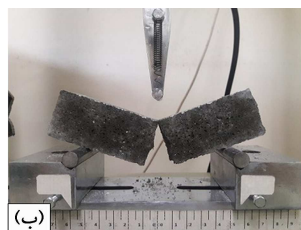
شکل	درصد خلوص	رنگ	pH	اندازه ی ذرات
نانو پودر	۹۹	سفید	۵/۵ – ۳/۵	۱۵ تا ۱۸ میلی متر

جدول ۳. مشخصات میکروالیاف فولادی و پلی پروپیلن.

ویژگی	الیاف فولادی	الیاف پلی پروپیلن
طول (mm)	۱۸	۱۲
قطر (mm)	۰/۷	۰/۱
مقاومت کششی (MPa)	۱۰۵۰	۳۲۰
نسبت ابعادی (L/D)	۲۵/۷	۱۲۰

جدول ۴. جزئیات نسبت‌های مخلوط کامپوزیت سیمانی.

کد طرح	مواد سیمانی (kg/m <sup>۳</sup> )		میکروالیاف (درصد) حجمی مواد سیمانی		آب (kg/m <sup>۳</sup> )	ماسه (kg/m <sup>۳</sup> )	نسبت آب به مواد سیمانی	نسبت ماسه به مواد سیمانی	پلی کر بکسیلات اثر (درصد وزنی مواد سیمانی)
	سیمان	نانوسیلیس	فولادی	پلی پروپیلن					
Control	۵۳۴	—	—	—	۲۴۰/۳	۱۳۸۸/۴	۰/۴۵	۲/۶	۰/۳
M۱	۵۲۳/۳۲	۱۰/۶۸	—	—	۲۴۰/۳	۱۳۸۸/۴	۰/۴۵	۲/۶	۰/۵۵
M۲	۵۳۴	—	۱	—	۲۴۰/۳	۱۳۸۸/۴	۰/۴۵	۲/۶	۰/۵
M۳	۵۳۴	—	—	۰/۲	۲۴۰/۳	۱۳۸۸/۴	۰/۴۵	۲/۶	۰/۵۵
M۴	۵۳۴	—	۱	۰/۲	۲۴۰/۳	۱۳۸۸/۴	۰/۴۵	۲/۶	۰/۶
M۵	۵۲۳/۳۲	۱۰/۶۸	۱	۰/۲	۲۴۰/۳	۱۳۸۸/۴	۰/۴۵	۲/۶	۰/۷



شکل ۲. الف) نمونه‌ی منشوری تحت بارگذاری خمشی سه نقطه؛ ب) نحوه‌ی شکست نمونه‌ی خمشی.

مواد سیمانی و ماسه به مواد سیمانی در پژوهش حاضر استفاده شده است. همچنین درصد‌های بهینه‌ی فوق روان‌کننده‌ی مصرفی نیز در جدول ۴ ارائه شده است. براساس جزئیات طرح مخلوط کامپوزیت سیمانی ارائه شده در جدول ۴ و مطابق روش پیشنهادی استاندارد ASTM C۳۰۵<sup>[۲۰]</sup>، مصالح مصرفی مخلوط شدند. پس از آماده‌سازی قالب‌های مرتبط، ملات ساخته شده در قالب‌ها ریخته شد. برای کاهش حباب‌های هوای موجود در کامپوزیت سیمانی، نمونه‌ها به مدت ۲ دقیقه با بسامد ۲۵ (Hz) بر روی میز لرزه و تحت ویریه قرار گرفتند. نمونه‌ها بعد از ۲۴ ساعت از قالب خارج و به مدت ۲۸ و ۹۰ روز در آب آهک اشباع شده مطابق با استاندارد ASTM C۵۱۱<sup>[۲۱]</sup> عمل‌آوری شدند.

#### ۴.۲. شرح آزمایش

##### ۱.۴.۲. مقاومت فشاری

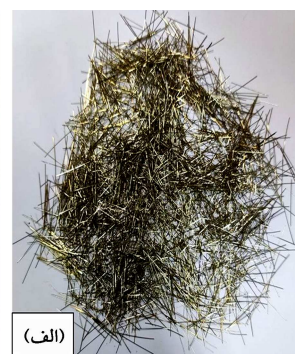
به منظور تعیین مقاومت فشاری، نمونه‌های مکعبی شکل کامپوزیت سیمانی با ابعاد (cm) ۵ مطابق با استاندارد ASTM C۱۰۹<sup>[۲۷]</sup> تحت آزمایش قرار گرفتند. در انتها، میانگین نتایج ۳ آزمایش به عنوان مقاومت فشاری ثبت شده برای هر نسبت مخلوط گزارش شد.

##### ۲.۴.۲. مقاومت خمشی

به منظور تعیین مقاومت خمشی، نمونه‌های منشوری شکل کامپوزیت سیمانی با ابعاد (cm) ۱۶ × ۴ × ۴ مطابق با استاندارد ASTM C۳۴۸<sup>[۲۲]</sup> تحت آزمایش خمشی سه نقطه قرار گرفتند (شکل ۲). در پایان، میانگین نتایج ۳ آزمایش ثبت و مقاومت خمشی برای هر نسبت مخلوط محاسبه شد.

##### ۳.۴.۲. مقاومت کششی

آزمایش مقاومت کششی به روش دو نیم کردن نمونه‌ها، که با عنوان آزمایش کشش برزیلی نیز شناخته می‌شود، مطابق با الزامات استاندارد ASTM C۴۹۶<sup>[۲۳]</sup> و بر روی نمونه‌های استوانه‌ای با ابعاد (cm) ۱۵ × ۳۰ انجام شد.



ب) میکرو الیاف پلی پروپیلن.

الف) میکرو الیاف فولادی؛

شکل ۱. تصاویر ظاهری میکروالیاف مصرفی.

و مدت زمان ۱۰ دقیقه، عمل پراکنش نانوسیلیس در آب انجام شده است. این تذکر لازم است که در حین فرایند آلتراسونیک، بشر حاوی نانوسیلیس در حمام آب یخ گذاشته شد، تا در هنگام پراکنش توسط دستگاه مافوق صوت از گرم شدن بیش از حد محلول جلوگیری شود.

#### ۳.۲. نسبت‌های مخلوط، نحوه‌ی اختلاط، آماده‌سازی و عمل‌آوری

##### نمونه‌های کامپوزیت سیمانی

جزئیات نسبت‌های مخلوط کامپوزیت سیمانی در جدول ۴ ارائه شده است. درصد‌های مصرفی نانوسیلیس، میکروالیاف فولادی و پلی پروپیلن، در پژوهش حاضر، براساس درصد‌های مطلوب و بهینه‌ی استفاده شده در پژوهش‌های پیشین انتخاب شده است. در همین راستا، از ۲٪ وزنی نانوسیلیس<sup>[۲۳،۲۲]</sup> به عنوان جایگزین سیمان و به ترتیب ۱٪ حجمی از میکروالیاف فولادی<sup>[۲۵-۲۳]</sup> و ۰/۲٪ حجمی میکروالیاف پلی پروپیلن<sup>[۲۶،۲۳،۲۷]</sup> به عنوان افزودنی در کامپوزیت سیمانی به صورت مجزا و توأمان استفاده شده است.

این تذکر لازم است که با اقتباس از استاندارد ASTM C۱۰۹<sup>[۲۷]</sup> مقادیر ۴۸۵ و ۲/۷۵ به ترتیب به عنوان مقادیر اولیه برای نسبت آب به مواد سیمانی و ماسه به مواد سیمانی در نظر گرفته شده است. لذا مقادیر اولیه‌ی مذکور به همراه درصد‌های مصرفی مختلف فوق روان‌کننده تحت سعی و خطاهای مکرر آزمایشگاهی قرار گرفتند. به همین منظور از آزمایش‌های مینی اسلامپ<sup>[۲۸]</sup> و میز جریان<sup>[۲۹]</sup> با هدف ثابت نگه داشتن کارایی (مقدار افت اسلامپ ۰/۱ ± ۱/۲ سانتی متر و همین‌طور مقدار پخش شدگی ۱۰ ± ۱۳۰ میلی متر در آزمایش میز جریان) در تمامی مخلوط‌ها استفاده شد. نهایتاً مقادیر ۴۵ و ۲/۶ به ترتیب به عنوان مقادیر بهینه‌ی نسبت آب به

#### ۴.۴.۲. سرعت پالس فراصوت

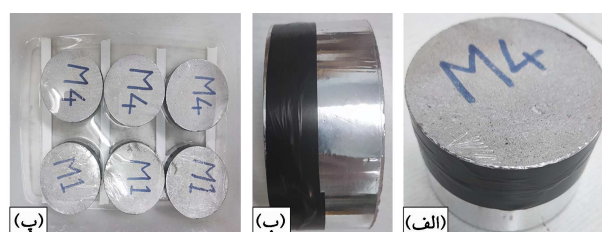
آزمایش سرعت پالس فراصوت بر روی نمونه‌های منشوری با ابعاد  $4 \times 4 \times 16$  (cm) قبل از انجام آزمایش خمشی سه نقطه‌ای مطابق استاندارد ASTM C597 [33] انجام شده است. این تذکر لازم است که قبل از انجام آزمایش، دستگاه با کمک میله‌ی استاندارد کالیبره و سپس به منظور اتصال بهتر پروب‌های دستگاه، سطح نمونه‌ها روغن‌کاری شد و سرعت پالس عبوری هر نمونه ۳ بار اندازه‌گیری و مقدار میانگین آن‌ها به عنوان سرعت پالس فراصوت گزارش شده است.

#### ۵.۴.۲. جذب آب مویینه

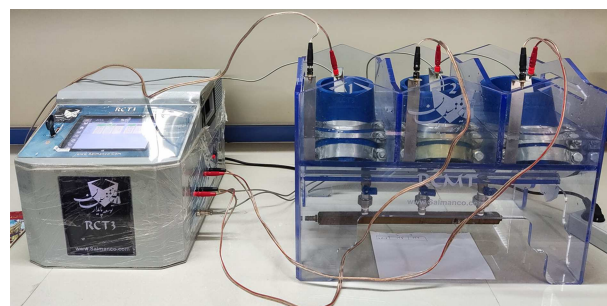
نرخ جذب آب کامپوزیت سیمانی مطابق استاندارد ASTM C1585 [35]، بر روی ۳ نمونه‌ی دیسکی مشابه با قطر ۱۰ و ارتفاع ۵ (cm) انجام شد. پس از خشک کردن نمونه‌ها در آون معمولی با دمای  $50^\circ\text{C}$  به مدت ۲۴ ساعت، سطوح جانبی و بالایی نمونه‌ها با استفاده از چسب آلومینیومی و پوششی نایلونی کاملاً پوشانده شد، تا آب به صورت تک جهته از سطح، در تماس با آب (سطح زیرین) نمونه حرکت کند (شکل ۳ الف و ب)). سپس، نمونه‌ها توزین و به عنوان وزن خشک نمونه‌ها قبل از غوطه‌وری در آب ثبت شدند. در ادامه، نمونه‌های دیسکی در یک ظرف حاوی آب، که فقط ۳ میلی‌متر آن بالاتر از کف نمونه بود، قرار گرفتند (شکل ۳ - پ). سپس وزن نمونه‌ها در فواصل زمانی ۱، ۵، ۱۰، ۲۰، ۳۰ و ۶۰ دقیقه و ۲، ۴، ۵، ۶ و ۲۴ ساعت و ۲، ۵، ۳، ۶، ۷ و ۸ روز از زمان شروع آزمایش ثبت شدند. بدین ترتیب با در اختیار داشتن وزن نمونه در حالت خشک و وزن آن در هر یک از فواصل زمانی ذکر شده و استفاده از دستورالعمل ارائه شده توسط استاندارد ASTM C1585 [35]، نرخ جذب آب اولیه و ثانویه تعیین شد.

#### ۶.۴.۲. مهاجرت تسریع شده‌ی یون کلرید (RCMT)

آزمایش RCMT کامپوزیت سیمانی مطابق استاندارد NT BUILD 492 [36]، بر روی ۳ نمونه‌ی دیسکی مشابه با قطر ۱۰ و ارتفاع ۵ (cm) انجام شد (شکل ۴). این تذکر لازم است که به منظور اندازه‌گیری عمق نفوذ یون کلرید، پس از پایان آزمایش، آزمون‌ها از دستگاه آزمایش خارج و با آب مقطر شسته و در راستای طولی با کمک جک فشاری (مشابه آزمایش کشش برزیلی) به دو نیم تقسیم شدند و یک نیمه



شکل ۳. الف) نمای سه‌بعدی سطح جانبی و فوقانی نمونه‌ی عایق‌بندی شده؛ ب) نمای جانبی؛ پ) تصویر آزمایش جذب آب مویینه.



شکل ۴. تصویر آزمایش RCMT.

برای اندازه‌گیری عمق نفوذ انتخاب شد. در ادامه، محلول نقره‌ی نیترات ۰/۸ نرمال بر روی سطح تازه‌ی شکافته شده افشانه شد. هنگامی که رسوب سفید رنگ نقره‌ی کلرید بر روی سطح شکافته شده به وضوح قابل مشاهده بود، عمق نفوذ یون کلرید اندازه‌گیری شد. پس از اتمام مدت زمان آزمایش، ضریب مهاجرت براساس رابطه‌ی ۱ محاسبه شد:

$$D_{nssm} = \frac{0.239(273 + T)L}{(U - 2)t} \left( x_d - 0.238\sqrt{\frac{(273 + T)Lx_d}{U - 2}} \right) \quad (1)$$

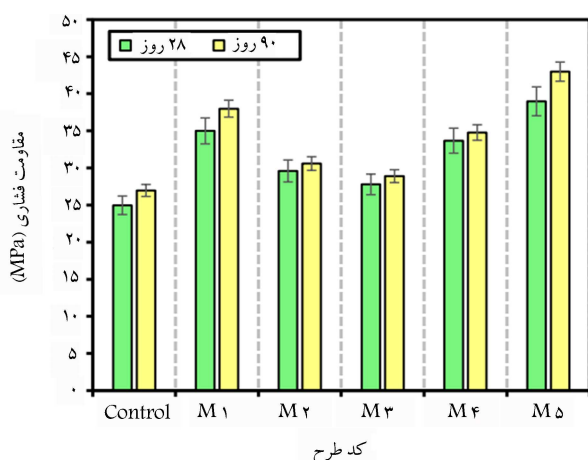
که در آن،  $D_{nssm}$  ضریب مهاجرت حالت غیر پایدار  $(\times 10^{-11} \text{ m}^2/\text{s})$ ،  $U$  ولتاژ اعمال شده برحسب  $(\text{V})$ ،  $T$  مقدار میانگین دمای اولیه و نهایی در محلول آنولیت بر حسب  $(^\circ\text{C})$ ،  $L$  ضخامت نمونه بر حسب  $(\text{mm})$ ،  $x_d$  مقدار میانگین عمق نفوذ بر حسب  $(\text{mm})$  و  $t$  مدت زمان انجام آزمایش برحسب ساعت هستند.

### ۳. نتایج و بحث

#### ۱.۳. مقاومت فشاری

در شکل ۵، نتایج حاصل از آزمایش مقاومت فشاری بر روی طرح مخلوط‌های ساخته شده در سنین ۲۸ و ۹۰ روزه مشاهده می‌شود؛ که مطابق آن، با افزایش سن عمل‌آوری از ۲۸ به ۹۰ روز، مقاومت فشاری کلیه‌ی طرح‌های مخلوط‌ها افزایش یافته است، که به واسطه‌ی پیشرفت فرایند هیدراسیون سیمان و همچنین افزایش واکنش پوزولانی در نمونه‌های حاوی نانوسیلیس با گذشت زمان است. [۲۷-۲۹] علاوه بر این، می‌توان مشاهده کرد با جایگزینی ۲٪ وزنی نانوسیلیس در طرح مخلوط M1، مقاومت فشاری ۲۸ و ۹۰ روزه‌ی ملات سیمانی افزایش یافته است؛ به نحوی که نتایج حاکی از آن بوده است که در نمونه‌ی M1، ۴۰/۹ و ۴۰/۱ درصد افزایش مقاومت فشاری به ترتیب در سنین ۲۸ و ۹۰ روزه در مقایسه با نمونه‌ی شاهد در سن‌های متناظر حاصل شده است. افزایش مقاومت فشاری در نمونه‌ی حاوی نانوسیلیس می‌تواند به واسطه‌ی چند مکانیزم عملکردی باشد، که به این صورت خلاصه شده است:

۱. تسریع در فرایند هیدراسیون سیمان و افزایش ژل کلسیم سیلیکات هیدراته (C-S-H) به واسطه‌ی ایجاد کانون‌های هسته‌زایی در ماتریس سیمانی، [۲۹،۷] (در واقع



شکل ۵. مقاومت فشاری نمونه‌های کامپوزیت سیمانی.

در حالی که نتایج نشان دهنده افزایش قابل توجه مقاومت خمشی در نمونه های حاوی میکروالیاف فولادی و پلی پروپیلن در سنین ۲۸ و ۹۰ روزه بوده است. در نمونه های حاوی ۱٪ حجمی الیاف فولادی (M۲)، ۲٪ حجمی الیاف پلی پروپیلن (M۳) و حالت هیبریدی آن ها (M۴) به ترتیب در سن ۲۸ روزه، ۲۷/۳، ۲۱/۶ و ۲۹/۹ درصد و در سن ۹۰ روزه، ۲۴/۶، ۲۲/۹ و ۲۷/۰ درصد افزایش مقاومت خمشی در مقایسه با نمونه ی شاهد در سنین متناظر مشاهده شده است. الیاف فولادی با توجه به مقاومت کششی بالایی که از خود نشان می دهند، میکروتکرک های موجود در ماتریس سیمانی را به نحو مناسبی کنترل و تنش های خمشی را جذب می کنند و مانع از گسترش ماکروتکرک ها در کامپوزیت سیمانی می شوند. [۴۳، ۴۶] در نتیجه، نمونه های حاوی الیاف فولادی عملکرد مطلوب تری را در معرض بارگذاری خمشی در مقایسه با نمونه ی شاهد از خود نشان می دهند. از سویی دیگر، الیاف پلی پروپیلن نیز به سبب انعطاف پذیری بالاتر، خاصیت مسلح کنندگی و پل زدگی خود نقش کلیدی را در جلوگیری از گسترش سریع ترک ها ایفا می کنند؛ لذا منجر به بهبود مقاومت خمشی در مقایسه با نمونه ی شاهد شدند. [۱۶]

با وجود این، با بررسی دقیق تر نتایج مشاهده شد که نتایج مقاومت خمشی نمونه ی M۲ بالاتر از نمونه ی M۳ است؛ هر چند اختلاف آن ها جزئی است. علت افزایش جزئی مقاومت خمشی نمونه ی حاوی میکروالیاف فولادی نسبت به نمونه ی حاوی میکروالیاف پلی پروپیلن می تواند به واسطه ی پخش نشدگی یکنواخت میکروالیاف فولادی در ماتریس سیمانی باشد. در واقع، با توجه به درصد مصرفی بالاتر میکروالیاف فولادی در مقایسه با میکروالیاف پلی پروپیلن، عدم پخش شدگی یکنواخت الیاف فولادی در ماتریس سیمانی محتمل است. لذا ممکن است پتانسیل آن ها برای بهبود مقاومت خمشی محدود شده باشد. از سویی، با توجه به نسبت ابعادی بالاتر میکروالیاف پلی پروپیلن نسبت به میکروالیاف فولادی، این عامل نیز ممکن است در اختلاف کم مابین این دو طرح تأثیرگذار باشد. همچنین هندسه ی میکروالیاف فولادی مصرفی در پژوهش حاضر (صاف با سطح مقطع دایره ای) نیز ممکن است در مقایسه با سایر شکل های میکروالیاف فولادی (الیاف فولادی با قلاب یا شکل چین دار) در بهبود مقاومت خمشی کامپوزیت سیمانی مطالعه شده، تأثیرگذاری کمتری داشته است. به صورت خلاصه می توان بیان کرد که دلایل ذکر شده می تواند علت احتمالی افزایش جزئی مقاومت خمشی نمونه ی M۲ نسبت به نمونه ی M۳ باشد.

علاوه بر این مشاهده شد که نمونه ی حاوی اثر توأمان نانوسیلیس، الیاف فولادی و الیاف پلی پروپیلن (M۵) بیشترین افزایش مقاومت خمشی را نتیجه داده است، که به ترتیب به میزان ۳۴/۴ و ۳۲/۳ درصد در سن ۲۸ و ۹۰ روز در مقایسه با نمونه ی شاهد در سنین متناظر است. لذا چنین می توان بیان کرد که در نمونه ی مذکور اثر مسلح کنندگی میکروالیاف فولادی و پلی پروپیلن و تا حدی آثار کانون های هسته زایی، پُرکنندگی و فعالیت پوزولانی نانوسیلیس با همدیگر توأم شده و لذا بیشترین افزایش مقاومت خمشی در نمونه ی M۵ به دست آمده است. شایان ذکر است که در شکل ۷، بافت کامپوزیت سیمانی M۵ پس از آزمایش خمشی سه نقطه ای مشاهده می شود. در شکل ۸، منحنی نیرو - جابه جایی خمشی نمونه های کامپوزیت سیمانی در سنین ۲۸ و ۹۰ روزه مشاهده می شود. با در اختیار داشتن منحنی های نیرو - جابه جایی می توان مقدار چقرمگی خمشی را محاسبه کرد. این تذکر لازم است که چقرمگی خمشی به جذب انرژی تا زمان شکست اشاره دارد، که برابر با مساحت زیر منحنی نیرو - جابه جایی است. [۴۴] مقادیر چقرمگی خمشی نمونه های کامپوزیت سیمانی در سنین ۲۸ و ۹۰ روزه در جدول ۵ ارائه شده است. الگوی تغییرات چقرمگی خمشی نیز مشابه تغییرات مقاومت خمشی است که قبلاً تشریح شده است. به صورت

نانوذرات سیلیس به واسطه ی سایز نانویی خود، واکنش پذیری فوق العاده بالایی دارند) هر نانوذره به عنوان یک دانه برای هسته زایی  $C-S-H$  و فرایند رشد در خمیر سیمانی عمل می کند. بنابراین به واسطه ی این اثر منحصر به فرد، حضور نانوذرات سیلیس منجر به تسریع در واکنش هیدراسیون سیمان می شوند. [۴۳، ۴۷]

۲. کاهش تخلخل، اصلاح ساختار منافذ و ایجاد ریزساختار متراکم تر به دلیل ابعاد نانومقیاس و اثر پُرکنندگی آن ها. [۴۳، ۴۷]

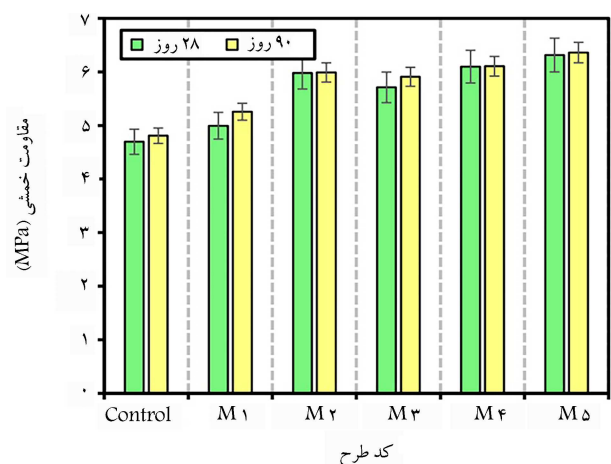
۳. افزایش تشکیل  $C-S-H$  ثانویه به علت خاصیت پوزولانی نانوسیلیس و واکنش با کلسیم هیدروکسید حاصل از هیدراسیون سیمان. [۴۳، ۴۷]

بنابراین افزایش مقاومت فشاری در نمونه های ملات سیمانی حاوی نانوسیلیس از سه مکانیزم اخیر نشأت گرفته است.

از طرفی با افزودن ۱٪ حجمی الیاف فولادی و ۲٪ حجمی الیاف پلی پروپیلن به صورت جداگانه در مخلوط های M۲ و M۳ و به صورت هیبریدی در مخلوط M۴ مشاهده می شود که به ترتیب در سن ۲۸ روزه، ۱۸/۵، ۱۱/۳ و ۳۴/۸ درصد و همچنین در سن ۹۰ روزه ۱۳/۴، ۷/۲ و ۲۸/۹ درصد افزایش مقاومت فشاری در مقایسه با نمونه ی شاهد در سنین متناظر را به دنبال داشته است. علت بهبود مقاومت فشاری با افزودن الیاف فولادی و همین طور الیاف پلی پروپیلن، به واسطه ی اثر مسلح کنندگی آن ها و ممانعت از شکست ترد در کامپوزیت سیمانی بوده است. [۴۳، ۴۶] علاوه بر این، در طرح مخلوط M۵، که بیانگر اثر توأمان نانوسیلیس، الیاف فولادی و الیاف پلی پروپیلن است؛ مشاهده شد که مقاومت فشاری در سنین ۲۸ و ۹۰ روزه به ترتیب به میزان ۵۶/۱ و ۵۹/۳ درصد در مقایسه با نمونه ی شاهد در سنین متناظر افزایش یافته است. با توجه به مطالب بیان شده در نمونه ی حاوی ترکیب نانوسیلیس، الیاف فولادی و الیاف پلی پروپیلن به دلیل حضور هم زمان سه ماده ی افزودنی در کامپوزیت سیمانی می توان مجموعه یی از مکانیزم های مذکور را متصور بود.

## ۲.۳. مقاومت خمشی

در شکل ۶، نتایج حاصل از آزمایش مقاومت خمشی بر روی طرح های مخلوط های ساخته شده در سنین ۲۸ و ۹۰ روزه مشاهده می شود؛ که مطابق آن، مشابه با نتایج حاصل از مقاومت فشاری، با افزایش سن عمل آوری از ۲۸ به ۹۰ روز، مقاومت خمشی کلیه ی طرح های مخلوط ها نیز افزایش یافته است. علاوه بر این، مشاهده می شود که افزودن ۲٪ وزنی نانوسیلیس تأثیر چندانی در بهبود مقاومت خمشی نداشته است.

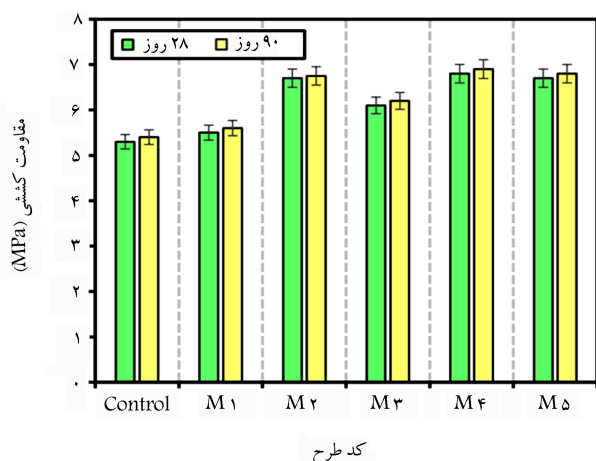


شکل ۶. مقاومت خمشی نمونه های کامپوزیت سیمانی.



جدول ۵. چقرمگی خمشی نمونه‌های کامپوزیت سیمانی.

کد طرح	سن عمل‌آوری			
	روزه ۹۰		روزه ۲۸	
	چقرمگی خمشی (ژول)	درصد افزایش	چقرمگی خمشی (ژول)	درصد افزایش
Control	۰/۲۲۹	-	۰/۲۱۹	-
M۱	۰/۲۶۴	۱۵/۳	۰/۲۴۵	۱۱/۹
M۲	۰/۳۲۸	۴۳/۱	۰/۳۰۰	۳۷/۰
M۳	۰/۳۲۵	۴۱/۹	۰/۲۸۲	۲۸/۸
M۴	۰/۳۶۸	۶۰/۷	۰/۳۵۹	۶۳/۹
M۵	۰/۳۸۳	۶۷/۲	۰/۳۷۰	۶۸/۹



شکل ۹. مقاومت کششی نمونه‌های کامپوزیت سیمانی.

ویژه‌یی را در جذب تنش‌های خمشی ناشی از بارگذاری استاتیکی ایفا می‌کند و از طرفی آثار کانون‌های هسته‌زایی و پوزولانی نانوسیلیس نیز با کمک به تشکیل ژل‌های مقاوم بیشتر در ماتریس سیمانی می‌تواند منجر به جذب انرژی بالاتر در نمونه‌ی M۵ شوند، که تجمع آثار اخیر، موجب دست‌یابی به بهبود در مقادیر چقرمگی خمشی مربوط به نمونه‌ی M۵ شده است.

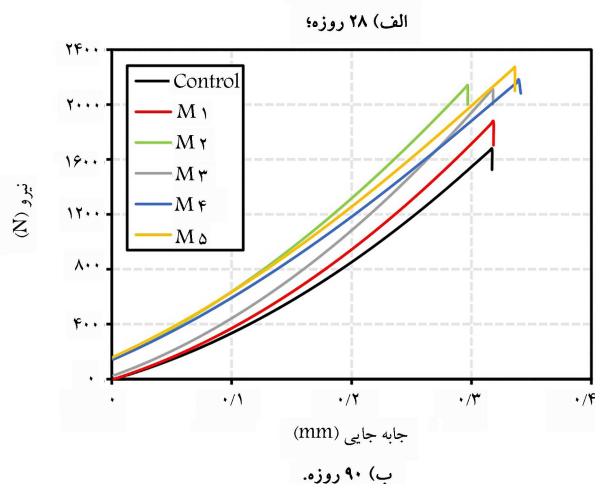
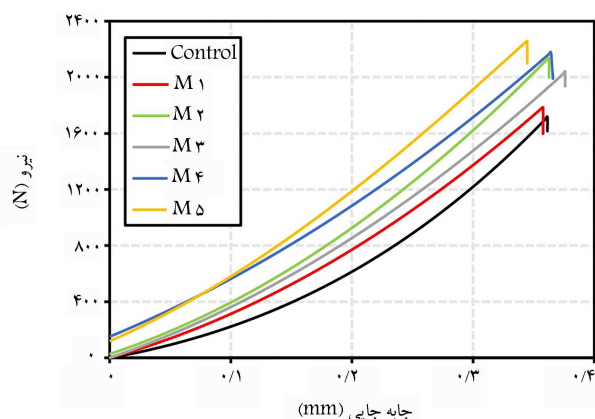
### ۳.۳. مقاومت کششی

در شکل ۹، نتایج حاصل از آزمایش مقاومت کششی بر روی طرح‌های مخلوط‌های ساخته‌شده در سنین ۲۸ و ۹۰ روزه مشاهده می‌شود؛ که مطابق آن، مشابه با نتایج حاصل از مقاومت‌های فشاری و خمشی، با افزایش سن عمل‌آوری از ۲۸ به ۹۰ روز، مقاومت کششی کلیه‌ی طرح‌های مخلوط‌ها نیز به‌صورت جزئی افزایش یافته است. افزون بر این مشاهده شد که افزودن ۲٪ وزنی نانوسیلیس، تأثیر قابل توجهی در بهبود مقاومت کششی نداشته است.

همچنین، در نمونه‌های حاوی ۱٪ حجمی الیاف فولادی (M۲)، ۲٪ حجمی الیاف پلی‌پروپیلن (M۳) و حالت هیبریدی آن‌ها (M۴) به‌ترتیب در سن ۲۸ روزه، ۲۶/۴، ۱۵/۱ و ۲۶/۴ درصد و در سن ۹۰ روزه، ۲۵/۰، ۱۴/۸ و ۲۵/۹ درصد افزایش مقاومت کششی در مقایسه با نمونه‌ی شاهد در سنین متناظر مشاهده شده است. افزایش مقاومت کششی در نمونه‌های اخیر، ناشی از عواملی مانند: نقش مسلح‌کنندگی و پل‌زدگی میکروالیاف‌ها، خاصیت انعطاف‌پذیری الیاف پلی‌پروپیلن و مقاومت کششی بالای الیاف فولادی بوده است. [۲۶، ۲۳]



شکل ۷. بافت کامپوزیت سیمانی M۵ پس از آزمایش خمشی سه‌نقطه‌یی.



شکل ۸. منحنی نیرو - جابه‌جایی خمشی نمونه‌های کامپوزیت سیمانی ۲۸ و ۹۰ روزه.

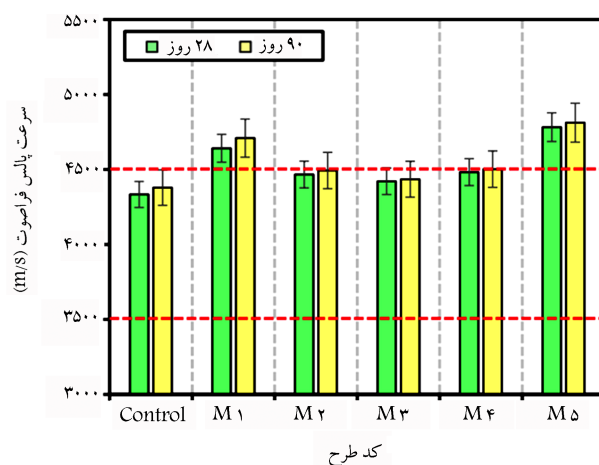
ویژه، نتایج نشان‌دهنده‌ی آن است که نمونه‌ی حاوی اثر توأمان نانوسیلیس، الیاف فولادی و الیاف پلی‌پروپیلن (M۵)، بیشترین میزان چقرمگی خمشی یا به عبارتی جذب انرژی در حین بارگذاری استاتیکی را نتیجه داده است. لذا چنین می‌توان بیان کرد که در نمونه‌ی M۵، اثر مسلح‌کنندگی میکروالیاف فولادی و پلی‌پروپیلن نقش

همچنین مشاهده شد که نمونه‌ی حاوی اثر توأمان نانوسیلیس، الیاف فولادی و الیاف پلی‌پروپیلن (M۵)، بیشترین افزایش مقاومت کششی، به میزان ۲۶/۴ و ۲۵/۹ درصد به ترتیب در سنین ۲۸ و ۹۰ روزه در مقایسه با نمونه‌ی شاهد در سنین متناظر را نتیجه داده است. لذا می‌توان بیان کرد که در نمونه‌های M۵، اثر مسلح‌کنندگی میکروالیاف‌های فولادی و پلی‌پروپیلن و تا حدی اثر کانون‌های هسته‌زایی و پوزولانی نانوسیلیس با همدیگر توأم شده است؛ که تجمیع آثار اخیر، علت افزایش مقاومت کششی ملات سیمانی نسبت به حالت معمولی است.

### ۴.۳. سرعت پالس فراصوت

در شکل ۱۰، نتایج حاصل از آزمایش سرعت پالس فراصوت بر روی طرح مخلوط‌های ساخته‌شده در سنین ۲۸ و ۹۰ روزه مشاهده می‌شود. نتایج حاکی از آن است که با افزایش سن عمل‌آوری از ۲۸ تا ۹۰ روز، سرعت پالس فراصوت کلیه‌ی طرح مخلوط‌ها نیز افزایش یافته است؛ که می‌تواند به دلیل ارتباط شدید مقادیر سرعت پالس فراصوت با نسبت حجمی فاز جامد موجود در ماتریس سیمان، نظیر ژل‌های مقاوم باشد.<sup>[۲۵]</sup> از این رو، پیشرفت بیشتر فرایند هیدراسیون سیمان و پیشرفت واکنش پوزولانی در طرح‌های مخلوط‌های حاوی نانوسیلیس، با افزایش سن عمل‌آوری منجر به تشکیل بیشتر محصولات حاصل از هیدراسیون از جمله ژل C-S-H می‌شود و متعاقباً تخلخل ماتریس سیمانی کاهش می‌یابد و موجب ایجاد ریزساختار متراکم‌تر و چگال‌تر خواهد شد.<sup>[۲۸]</sup>

علاوه بر این می‌توان مشاهده کرد با جایگزینی ۲٪ وزنی نانوسیلیس در طرح مخلوط M۱، پالس فراصوت با سرعت بالاتری از نمونه عبور کرده است، به نحوی که بالاترین سرعت موج عبوری را در مقایسه با سایر مخلوط‌ها (M۲، control، M۳ و M۴) از خود نشان داده است. در واقع، حضور نانوذرات سیلیس می‌تواند به واسطه‌ی اثر پرکنندگی منجر به کاهش تخلخل و اصلاح ریزساختار ماتریس سیمانی شود. از سویی دیگر، اثر کانون‌های هسته‌زایی نیز می‌تواند با تسریع واکنش هیدراسیون سیمان و تشکیل ژل C-S-H بیشتر، نقش قابل‌توجهی را در اصلاح میکروساختار ماتریس سیمانی ایفا کند. شایان ذکر است که نانوذرات سیلیس به واسطه‌ی خاصیت پوزولانی نیز می‌توانند با مصرف کلسیم هیدروکسید، تشکیل ژل C-S-H را تشدید کنند و بهبود کیفیت ریزساختار و افزایش همگنی آن را به ارمغان آورند.<sup>[۱۱،۷]</sup> از طرفی، نمونه‌های حاوی الیاف فولادی و فقط پلی‌پروپیلن، بهبودی جزئی در افزایش سرعت پالس فراصوت داشته‌اند؛ که می‌تواند به واسطه‌ی افزایش همگنی ریزساختار



شکل ۱۰. سرعت پالس فراصوت نمونه‌های کامپوزیت سیمانی.

و در نتیجه مکانیزم مسلح‌کنندگی میکروالیاف در کامپوزیت سیمانی باشد. از سویی دیگر، نمونه‌ی حاوی هیبرید نانوذرات سیلیس، الیاف فولادی، و الیاف پلی‌پروپیلن (M۵)، بیشترین افزایش سرعت پالس فراصوت در سنین ۲۸ و ۹۰ روزه را در مقایسه با نمونه‌ی شاهد در سنین متناظر از خود نشان داده است. لذا می‌توان بیان کرد که در نمونه‌ی (M۵)، اثر مسلح‌کنندگی میکروالیاف‌های فولادی و پلی‌پروپیلن، آثار پرکنندگی، کانون‌های هسته‌زایی و پوزولانی نانوذرات سیلیس با همدیگر توأم شده و لذا بیشترین بهبود در مقدار سرعت پالس فراصوت در نمونه‌ی M۵ به‌دست آمده است.

براساس طبقه‌بندی ارائه‌شده در جدول ۶، برای کیفیت بتن براساس نتایج حاصل از آزمایش سرعت پالس فراصوت مشاهده می‌شود که مخلوط حاوی فقط نانوسیلیس (M۱) و همین‌طور مخلوط حاوی هیبرید نانوذرات سیلیس، الیاف فولادی و پلی‌پروپیلن (M۵)، دارای مقادیر سرعت پالس فراصوت بیش از ۴۵۰۰ (m/sec) هستند؛ بنابراین در دسته‌ی کامپوزیت‌های سیمانی با کیفیت عالی طبقه‌بندی خواهند شد.

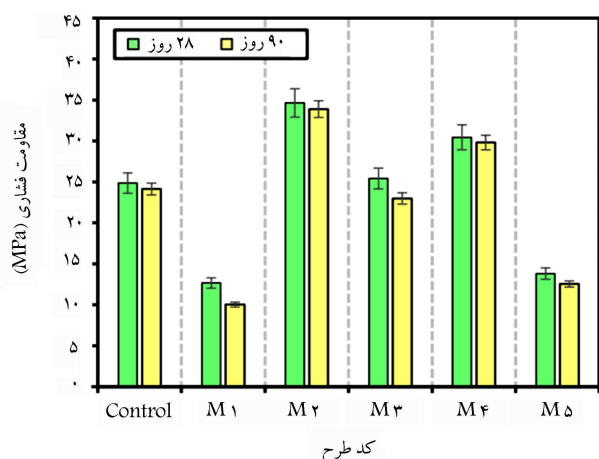
### ۵.۳. نرخ جذب آب

نتایج نرخ جذب آب مویینه‌ی طرح‌های مخلوط‌های ساخته‌شده و خطوط برازش دو مرحله‌ی اعمال‌شده بر نتایج به‌دست‌آمده، در شکل ۱۱ مشاهده می‌شود. این تذکر لازم است که نتایج جذب مویینگی محاسبه‌شده از خطوط برازش‌شده در شکل ۱۱، در جدول ۷ ارائه شده است؛ که مطابق آن، افزودن نانوسیلیس در ملات سیمانی می‌تواند مقاومت در برابر جذب آب اولیه‌ی ملات سیمانی را نسبت به نمونه‌ی شاهد جدول ۶. طبقه‌بندی کیفیت ریزساختار بتن براساس مقادیر سرعت پالس فراصوت.<sup>[۴۶]</sup>

کیفیت بتن	سرعت پالس فراصوت (m/sec)
عالی	بیشتر از ۴۵۰۰
خوب	۳۵۰۰ تا ۴۵۰۰
مشکوک	۳۰۰۰ تا ۳۵۰۰
ضعیف	۲۰۰۰ تا ۳۰۰۰
خیلی ضعیف	۲۰۰۰

جدول ۷. نتایج جذب مویینگی محاسبه‌شده از خطوط برازش‌شده در شکل ۱۱.

سن عمل‌آوری	کد طرح	نرخ جذب آب اولیه ( $\times 10^{-2} \text{ mm/min}^{0.5}$ )	نرخ جذب آب ثانویه ( $\times 10^{-2} \text{ mm/min}^{0.5}$ )
۲۸ روز	Control	۲۵/۹۲	۳/۱۰
	M۱	۲۰/۹۴	۲/۳۳
	M۲	۲۱/۳۲	۲/۶۱
	M۳	۲۱/۵۹	۲/۷۶
	M۴	۲۱/۱۱	۲/۲۹
	M۵	۱۹/۸۵	۲/۱۸
۹۰ روز	Control	۲۱/۳۲	۲/۵۶
	M۱	۱۸/۱۹	۲/۰۰
	M۲	۱۹/۰۷	۲/۲۲
	M۳	۱۹/۴۳	۲/۲۶
	M۴	۱۹/۲۶	۲/۱۹
	M۵	۱۵/۴۲	۱/۹۷



شکل ۱۲. ضریب مهاجرت یون کلرید نمونه‌های کامپوزیت سیمانی.

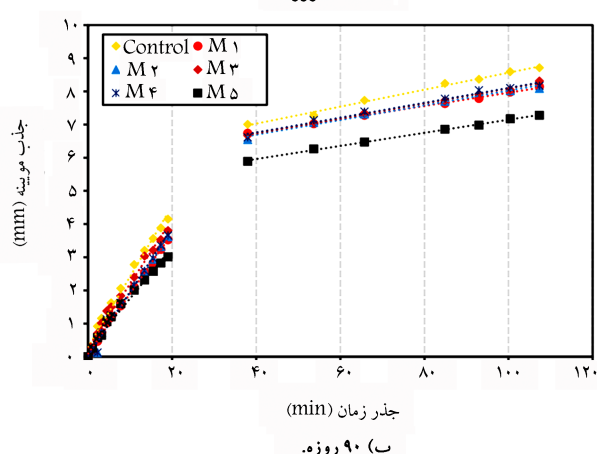
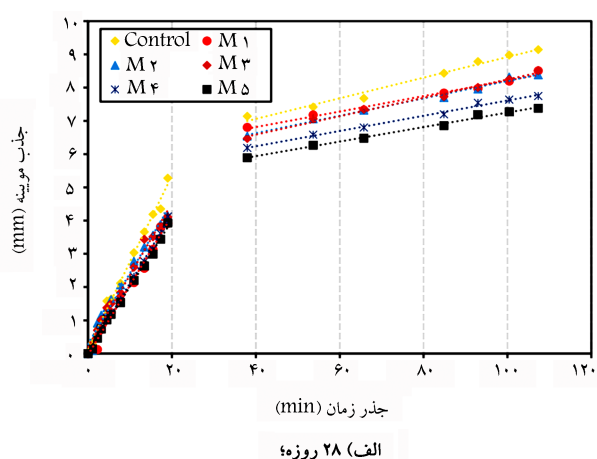
عملکردی ذکر شده، علت کاهش قابل توجه نرخ جذب موئینه‌ی اولیه نسبت به نمونه‌ی شاهد (به میزان ۲۳/۴ و ۲۷/۷ درصدی به ترتیب در سنین ۲۸ و ۹۰ روزه) است.

مطابق جدول ۷، الگوی مشاهده شده در ارتباط با نرخ جذب آب ثانویه نیز کاملاً مشابه نرخ جذب آب اولیه در کلیه‌ی طرح‌های مخلوط ساخته شده است.

### ۶.۳. مهاجرت تسریع شده‌ی یون کلرید (RCMT)

نتایج آزمایش RCMT طرح مخلوط‌های ساخته شده در سنین ۲۸ و ۹۰ روزه در شکل ۱۲ مشاهده می‌شود. نتایج حاکی از آن است که با افزایش سن عمل‌آوری از ۲۸ روز، مقادیر ضریب مهاجرت کلرید کلیه‌ی طرح‌های مخلوط‌ها کاهش یافته است. از سویی دیگر، کامپوزیت سیمانی حاوی ۲٪ نانوسیلیس (M1) به ترتیب در سنین ۲۸ و ۹۰ روزه دارای کمترین مقدار  $10^{-12} \times 12/66$  و  $10^{-12} \times 10/03$  نانوسیلیس باشد. [۲۳، ۲۴]

در نمونه‌ی حاوی فقط الیاف پلی پروپیلن (M3) نیز ضریب مهاجرت یون کلرید در مقایسه با نمونه‌ی شاهد کاهش یافته است. علت این موضوع می‌تواند به واسطه‌ی کنترل ترک‌های خمیری و در نتیجه کاهش تخلخل ماتریس سیمانی باشد؛ [۲۷] در نتیجه، یون‌های کلرید کمتری قادر به نفوذ در نمونه‌ی حاوی میکروالیاف پلی پروپیلن هستند. در مقابل، مقادیر ضریب مهاجرت یون کلرید در نمونه‌ی حاوی فقط الیاف فولادی (M2) و حالت هیبریدی میکروالیاف فولادی و پلی پروپیلن (M4) افزایش قابل توجهی در مقایسه با نمونه‌ی شاهد داشته است. علت این موضوع به حضور مؤلفه‌ی رسانایی همچون الیاف فولادی در کامپوزیت سیمانی‌های مذکور نسبت داده می‌شود؛ که به نوبه‌ی خود منجر به عبور جریان الکتریکی بیشتر از نمونه‌های مذکور در حین آزمایش RCMT خواهد شد. [۲۶] اساساً در آزمایش‌های تسریع شده‌ی نفوذ یون کلرید، مقدار کل جریان عبوری از یک نمونه‌ی اشباع شده تحت اختلاف ولتاژ مشخص در طی یک مدت زمان مشخص تحت اثر یک میدان الکتریکی اندازه‌گیری می‌شود. فرض بر این است که عبور جریان از نمونه و از طریق محلول منفذی بتن، که به عنوان الکترولیت عمل می‌کند، صورت می‌گیرد.



شکل ۱۱. روابط بین مقدار جذب موئینه، جذر زمان و خطوط برازش دو مرحله‌ی ۲۸ و ۹۰ روزه.

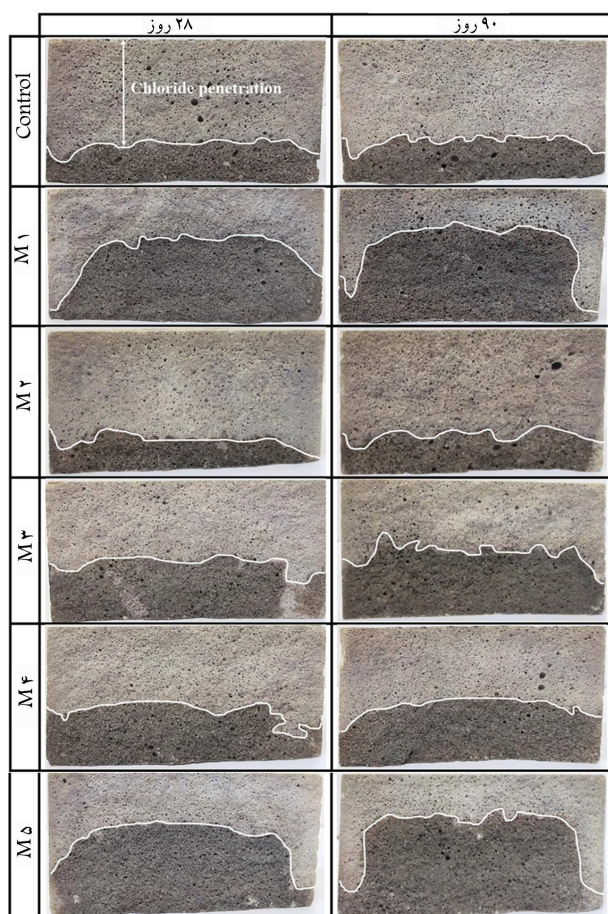
بهبود ببخشند. به نحوی که در نمونه‌ی حاوی ۲٪ نانوسیلیس (M1)، نرخ جذب آب موئینه‌ی اولیه به ترتیب در سنین ۲۸ و ۹۰ روز، ۱۹/۲ و ۱۴/۷ درصد در مقایسه با نمونه‌ی شاهد در سنین متناظر کاهش یافته است. علت کاهش نرخ جذب آب اولیه در نمونه‌ی M1 می‌تواند به واسطه‌ی کاهش تخلخل و بهبود ریزساختار ماتریس سیمانی با کمک مکانیزم‌های پرکنندگی، کانون‌های هسته‌زایی و خاصیت پوزولانی نانوسیلیس باشد. [۲۹-۳۷] لذا در اثر مکانیزم‌های ذکر شده، ساختار منافذ اصلاح می‌شود و یک ماتریس سیمانی متراکم‌تر با تخلخل کمتر به دست می‌آید. همچنین، اندازه‌ی حفره‌ها به سمت حفره‌های با اندازه‌ی ریزتر سوق پیدا می‌کند و متعاقباً نفوذ آب به کامپوزیت سیمانی کاهش می‌یابد و در نتیجه، کاهش نرخ جذب آب موئینه‌ی اولیه مشاهده می‌شود. [۴۲]

از سویی دیگر، در نمونه‌های حاوی میکروالیاف فولادی و فقط پلی پروپیلن (M2) و M3 و همین‌طور حالت هیبریدی آن‌ها (M4) نیز کاهش جزئی نرخ جذب آب اولیه در مقایسه با نمونه‌ی شاهد مشاهده می‌شود. این پدیده را می‌توان به عملکرد مناسب میکروالیاف‌های فولادی و پلی پروپیلن در کنترل افزایش ترک‌های ناشی از جمع‌شدگی خمیری در ساعات اولیه‌ی گیرش کامپوزیت سیمانی و ترک‌های ثانویه یا حرارتی که منجر به ایجاد تخلخل در کامپوزیت سیمانی خواهند شد؛ نسبت داد. [۱۵] همچنین مشاهده شد که کمترین مقدار نرخ جذب آب اولیه متعلق به نمونه‌ی حاوی اثر توأمان نانوسیلیس، الیاف فولادی و الیاف پلی پروپیلن (M5) در سنین ۲۸ و ۹۰ روزه بوده است. لذا در توضیح آن می‌توان بیان کرد که تجمع مکانیزم‌های



جدول ۸. عمق نفوذ یون کلرید نمونه‌های کامپوزیت سیمانی.

کد طرح	سن عمل‌آوری (میلی‌متر)	
	روز ۲۸	روز ۹۰
Control	۳۴٫۶	۳۳٫۶
M۱	۱۸٫۵	۱۵٫۰
M۲	۳۵٫۶	۳۴٫۹
M۳	۲۶٫۷	۲۴٫۴
M۴	۲۸٫۰	۲۵٫۹
M۵	۱۸٫۷	۱۴٫۲



شکل ۱۳. پروفیل فیزیکی نفوذ یون کلرید در نمونه‌های کامپوزیت سیمانی.

کامپوزیت سیمانی منجر به بهبود مقاومت‌های فشاری، خمشی و کششی، چقرمگی خمشی و سرعت پالس فراصوت آن شده است.

۲. بررسی نتایج نرخ جذب آب مویینه به‌عنوان شاخصی مهم در بحث نفوذپذیری کامپوزیت سیمانی، نشان داد که کمترین مقدار نرخ جذب آب اولیه و ثانویه متعلق به نمونه‌ی حاوی ترکیب توأمان نانوسیلیس، الیاف فولاد و الیاف پلی‌پروپیلن (M۵) در سنین ۲۸ و ۹۰ روزه بوده است. همچنین نتایج مربوط به آزمایش RCMT نیز نشان‌دهنده‌ی افزایش مقاومت در برابر نفوذ یون کلرید و همین‌طور کاهش عمق نفوذ یون کلرید در کامپوزیت سیمانی M۵ است. به‌نحوی که ترکیب هم‌زمان ۲٪ نانوسیلیس، ۱٪ میکروالیاف فولادی و ۲٪ میکروالیاف پلی‌پروپیلن در کامپوزیت سیمانی ۹۰ روزه موجب کاهش عمق نفوذ یون کلرید از ۳۳٫۶ میلی‌متر (در نمونه‌ی شاهد) به ۱۴٫۲ میلی‌متر (در نمونه‌ی M۵) شده است.

۳. بهبود خواص مکانیکی، نفوذپذیری و دوام در برابر کلرید کامپوزیت سیمانی در هنگام استفاده‌ی هم‌زمان نانوسیلیس، میکروالیاف فولادی و پلی‌پروپیلن می‌تواند به‌واسطه‌ی مجموعه‌ی از مکانیزم‌های عملکردی مواد مذکور باشد. در واقع اثر پُرکنندگی، کانون‌های هسته‌زایی و فعالیت پوزلانی نانوذرات سیلیس می‌تواند به کاهش تخلخل و بهبود ریزساختار ماتریس سیمانی کمک شایانی کند. از طرفی، میکروالیاف فولادی و پلی‌پروپیلن نیز به موجب اثر مسلح‌کنندگی و کنترل میکروتکرک‌های موجود در ماتریس سیمانی مانع از گسترش ماکروتکرک‌ها و شکست تَرَد در کامپوزیت سیمانی می‌شوند. افزون بر این، اثر کنترل ترک‌های ناشی از جمع‌شدگی خمیری در ساعات اولیه‌ی گیرش و ترک‌های ثانویه یا

با توجه به اینکه مقدار و پیوستگی منافذ نمونه‌های بتنی روی عبور یون‌ها و در نتیجه مقدار جریان عبوری تأثیرگذار هستند، انتظار می‌رود که نمونه‌های متخلخل با منافذ پیوسته دارای جریان عبوری زیاد و نمونه‌های با تخلخل و پیوستگی منافذ کم دارای جریان عبوری کم باشند. حال حضور یک مؤلفه‌ی رسانا نیز در کامپوزیت سیمانی تحت آزمایش منجر به تشدید عبور جریان الکتریکی از نمونه خواهد شد. لذا بر همین اساس، مقادیر به‌دست‌آمده برای ضریب مهاجرت مربوط به نمونه‌ی M۲ بیشتر از نمونه‌ی M۳ بوده است، که به روند معکوسی در مقایسه با نتایج نرخ جذب آب منتج شده است.

در ارتباط با نمونه‌ی حاوی اثر توأمان نانوسیلیس، میکروالیاف فولادی و میکروالیاف پلی‌پروپیلن (M۵) می‌توان مشاهده کرد که حضور میکروالیاف فولادی در طرح (M۵)، منجر به افزایش ضریب مهاجرت یون کلرید و نیز حضور نانوسیلیس و میکروالیاف پلی‌پروپیلن منجر به کاهش ضریب مهاجرت یون کلرید شده است. لذا با توجه به مقادیر به‌دست‌آمده در نمونه‌ی M۵ در سنین ۲۸ و ۹۰ روزه و مقایسه با نمونه‌های حاوی نانوذرات سیلیس، میکروالیاف فولادی و فقط پلی‌پروپیلن، می‌توان پی برد که نانوذرات سیلیس و میکروالیاف پلی‌پروپیلن می‌توانند اثر منفی میکروالیاف فولادی در مقادیر ضریب مهاجرت یون کلرید را خنثی کنند و نهایتاً منجر به حصول مقادیر ضریب مهاجرت یون کلرید کمتر از نمونه‌ی شاهد در نمونه‌ی M۵ شوند.

علاوه بر این، در جدول ۸، مقادیر عمق نفوذ یون کلرید اندازه‌گیری شده در طرح‌های مخلوط‌های ساخته شده در سنین ۲۸ و ۹۰ روز ارائه شده است؛ که مطابق آن، کاهش قابل توجه عمق نفوذ یون کلرید را می‌توان برای نمونه‌ی M۱ در مقایسه با نمونه‌ی شاهد در هر دو سن ۲۸ و ۹۰ روزه مشاهده کرد. از سویی دیگر، افزایش عمق نفوذ یون کلرید در نمونه‌های M۲ و M۴ در مقایسه با نمونه‌ی شاهد مشهود است. شایان ذکر است که در نمونه‌ی M۵ نیز واضح است که جایگزینی سیمان با ۲٪ نانوسیلیس و افزودن ۱٪ حجمی میکروالیاف فولادی و ۲٪ حجمی میکروالیاف پلی‌پروپیلن منجر به کاهش عمق نفوذ یون کلرید تا ۱۴٫۲ میلی‌متر در سن ۹۰ روزه شده است. همچنین در شکل ۱۳، پروفیل فیزیکی نفوذ یون کلرید در ملات‌های سیمانی مشاهده می‌شود؛ که عمق نفوذ با خطوط سفید نشان داده شده است.

#### ۴. نتیجه‌گیری

در پژوهش حاضر، اثر ترکیبی نانوذرات سیلیس، میکروالیاف فولادی، و پلی‌پروپیلن در مشخصات مکانیکی، نفوذپذیری و تهاجم کلریدی کامپوزیت سیمانی بررسی شد، که مهم‌ترین نتایج آن به این شرح است:

۱. حضور هم‌زمان نانوسیلیس، میکروالیاف فولادی و پلی‌پروپیلن در طرح مخلوط

استفاده‌ی هم‌زمان نانوذرات سیلیس و میکروالیاف‌های فولادی و پلی‌پروپیلن نه فقط منجر به بهبود خواص مکانیکی کامپوزیت‌های سیمانی خواهد شد، بلکه منجر به کاهش نفوذپذیری و بهبود دوام در برابر تهاجم کلریدی به‌صورت هم‌زمان خواهد شد. لذا می‌توان چنین جمع‌بندی کرد که استفاده از ترکیب نوآمان نانوذرات سیلیس، میکروالیاف فولادی، و پلی‌پروپیلن، در کامپوزیت‌های سیمانی در مقایسه با استفاده‌ی مجزای آن‌ها می‌تواند بهبود چندگانه‌ی خصوصیات مختلف کامپوزیت‌های سیمانی را به ارمغان آورد.

حرارتی به‌واسطه‌ی اثر پل‌زدگی الیاف فولادی و پلی‌پروپیلن نیز می‌تواند در بهبود مشخصات ملات سیمانی ایفای نقش کند.

۴. استفاده از فقط نانوذرات سیلیس می‌تواند عملکرد قابل توجهی در کاهش نفوذپذیری و بهبود دوام کامپوزیت‌های سیمانی داشته باشد. از سویی دیگر، به‌کارگیری میکروالیاف فولادی و پلی‌پروپیلن به‌صورت منفرد می‌تواند فقط نقش برجسته‌ی در بهبود خواص مکانیکی داشته باشند. با تفاسیر ذکرشده،

## پانوشته‌ها

1. Chithra
2. Yazıcı
3. Wang
4. Probe

## منابع (References)

1. Mehta, P.K. and Monteiro, P.J., 2014. *Concrete: Microstructure, Properties, and Materials*. McGraw-Hill Education. doi: 10.1036/0071462899.
2. Zhao, S. and Sun, W., 2014. Nano-mechanical behavior of a green ultra-high performance concrete. *Construction and Building Materials*, 63, pp. 150-160. doi: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.04.029>.
3. Wang, C., Yang, C., Liu, F., Wan, C. and Pu, X., 2012. Preparation of ultra-high performance concrete with common technology and materials. *Cement and Concrete Composites*, 34(4), pp. 538-544. doi: <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2011.11.005>.
4. Massana, J., Reyes, E., Bernal, J., León, N. and Sánchez-Espinosa, E., 2018. Influence of nano- and micro-silica additions on the durability of a high-performance self-compacting concrete. *Construction and Building Materials*, 165, pp. 93-103. doi: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.12.100>.
5. Shekari, A. and Razzaghi, M.S., 2011. Influence of nano particles on durability and mechanical properties of high performance concrete. *Procedia Engineering*, 14, pp. 3036-3041. doi: <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2011.07.382>.
6. Du, H., Du, S., and Liu, X., 2014. Durability performances of concrete with nano-silica. *Construction and Building Materials*, 73, pp. 705-712. doi: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.10.014>.
7. Beigi, M.H., Berenjian, J., Omran, O.L., Nik, A.S. and Nikbin, I.M., 2013. An experimental survey on combined effects of fibers and nanosilica on the mechanical, rheological, and durability properties of self-compacting concrete. *Materials & Design*, 50, pp. 1019-1029. doi: <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2013.03.046>.
8. Rashidi, Y., Korayem, A.H., Farsi, S. and Sadeghi, J., 2023. Utilizing halloysite nanotube to enhance the properties of cement mortar subjected to freeze-thaw cycles. *Journal of Building Engineering*, 75(2):106832. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2023.106832>. +
9. Pacheco-Torgal, F. and Jalali, S., 2011. Nanotechnology: Advantages and drawbacks in the field of construction and building materials. *Construction and Building Materials*, 25(2), pp. 582-590. doi: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2010.07.009>.
10. Khan, M.I., 2018. Nanosilica/silica fume. in *Waste and Supplementary Cementitious Materials in Concrete: Elsevier*, pp. 461-491. doi: <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-102156-9.00014-6>.
11. Chithra, S., Kumar, S.S. and Chinnaraju, K., 2016. The effect of colloidal nano-silica on workability, mechanical and durability properties of high performance concrete with copper slag as partial fine aggregate. *Construction and Building Materials*, 113, pp. 794-804. doi: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.03.119>.
12. Han, B., Yu, X., and Ou, J., 2014. *Self-Sensing Concrete in Smart Structures*, 1st ed. Butterworth-Heinemann (Elsevier), p. 398.
13. Yazıcı, Ş., İnan, G. and Tabak, V., 2007. Effect of of aspect ratio and volume fraction of steel fiber on the mechanical properties of SFRC. *Construction and Building Materials*, 21(6), pp. 1250-1253. doi: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2006.05.025>.
14. Behfarnia, K. and Behravan, A., 2014. Application of high performance polypropylene fibers in concrete lining of water tunnels. *Materials & Design*, 55, pp. 274-279. doi: <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2013.09.075>.
15. Toutanji, H.A., 1999. Properties of polypropylene fiber reinforced silica fume expansive-cement concrete. *Construction and Building Materials*, 13(4), pp. 171-177. doi: [https://doi.org/10.1016/S0950-0618\(99\)00027-6](https://doi.org/10.1016/S0950-0618(99)00027-6).
16. Wang, J., Dai, Q., Si, R. and Guo, S., 2019. Mechanical, durability, and microstructural properties of macro synthetic polypropylene (PP) fiber-reinforced rubber concrete. *Journal of Cleaner Production*, 234, pp. 1351-1364. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.06.272>.
17. Kakooei, S., Akil, H.M., Dolati, A. and Rouhi, J., 2012. The corrosion investigation of rebar em-

- bedded in the fibers reinforced concrete. *Construction and Building Materials*, 35, pp. 564-570. doi: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.04.051>.
18. Wheat, H.G., 2002. Using polymers to minimize corrosion of steel in concrete. *Cement and Concrete Composites*, 24(1), pp. 119-126. doi: [https://doi.org/10.1016/S0958-9465\(01\)00032-4](https://doi.org/10.1016/S0958-9465(01)00032-4).
19. Söylev, T. and Özturan, T., 2014. Durability, physical and mechanical properties of fiber-reinforced concretes at low-volume fraction. *Construction and Building Materials*, 73, pp. 67-75. doi: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.09.058>.
20. ASTM C778-13, 2013. Standard specification for standard sand. *ASTM International*, West Conshohocken, PA. doi: [doi.org/10.1520/C0778-21](https://doi.org/10.1520/C0778-21).
21. ASTM C494/C494M-16, 2016. Standard specification for chemical admixtures for concrete. *ASTM International*, West Conshohocken, PA. doi: [doi.org/10.1520/C0494.C0494M-19E01](https://doi.org/10.1520/C0494.C0494M-19E01).
22. Abhilash, P., Nayak, D.K., Sangoju, B., Kumar, R. and Kumar, V., 2021. Effect of nano-silica in concrete; A review. *Construction and Building Materials*, 278:122347. doi: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.122347>.
23. Sujay, H., Nair, N.A., Rao, H.S. and Sairam, V., 2020. Experimental study on durability characteristics of composite fiber reinforced high-performance concrete incorporating nanosilica and ultra fine fly ash. *Construction and Building Materials*, 262:120738. doi: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.120738>.
24. Folliard, K.J., Sutfin, D., Turner, R. and Whitney, D.P., 2006. *Fiber in Continuously Reinforced Concrete Pavements*. Technical Report No FHWA/TX-07/0-4392-2, 198 p. [https://ctr.utexas.edu/wp-content/uploads/pubs/0\\_4392.2.pdf](https://ctr.utexas.edu/wp-content/uploads/pubs/0_4392.2.pdf).
25. Khooshechin, M. and Tanzadeh, J., 2018. Experimental and mechanical performance of shotcrete made with nanomaterials and fiber reinforcement. *Construction and Building Materials*, 165, pp. 199-205 doi: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.12.199>.
26. Afroughsabet, V., Biolzi, L. and Ozbakkaloglu, T., 2016. High-performance fiber-reinforced concrete: A review. *Journal of Materials Science*, 51, pp. 6517-6551, doi: <https://doi.org/10.1007/s10853-016-9917-4>.
27. ASTM C109 / C109M-16a, 2016. Standard test method for compressive strength of hydraulic cement mortars (Using 2-in. or [50-mm] Cube Specimens). *ASTM International*, West Conshohocken, PA. doi: [doi.org/10.1520/C0109.C0109M-21](https://doi.org/10.1520/C0109.C0109M-21).
28. Rashidi, Y., Roudi, M.R.R., Korayem, A.H. and Shamsaei, E., 2021. Investigation of ultrasonication energy effect on workability, mechanical properties and pore structure of halloysite nanotube reinforced cement mortars. *Construction and Building Materials*, 304:124610. doi: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.124610>.
29. ASTM C230/C230M-14, 2014. Standard specification for flow table for use in Ttsts of hydraulic cement. *ASTM International*, West Conshohocken, PA. doi: [doi.org/10.1520/C0230.C0230M-23](https://doi.org/10.1520/C0230.C0230M-23).
30. ASTM C305-14, 2014. Standard practice for mechanical mixing of hydraulic cement pastes and mortars of plastic consistency. *ASTM International*, West Conshohocken, PA. doi: [doi.org/10.1520/C0305-20](https://doi.org/10.1520/C0305-20).
31. ASTM C511-03, 2014. Standard practice for mixing rooms, moist cabinets, moist rooms, and water storage tanks used in the testing of hydraulic cements and concretes. *ASTM International*, West Conshohocken, PA. doi: [doi.org/10.1520/C0511-21](https://doi.org/10.1520/C0511-21).
32. ASTM C348-14, 2014. Standard test method for flexural strength of hydraulic cement mortars. *ASTM International*, West Conshohocken, PA. doi: [doi.org/10.1520/C0349-18](https://doi.org/10.1520/C0349-18).
33. ASTM C496/C496M-04, 2014. Standard test method for splitting tensile strength of cylindrical concrete specimens. *ASTM International*, West Conshohocken, PA. doi: [doi.org/10.1520/C0496.C0496M-17](https://doi.org/10.1520/C0496.C0496M-17).
34. ASTM C597-16, 2016. Standard test method for pulse velocity through concrete. *ASTM International*, West Conshohocken, PA. doi: [doi.org/10.1520/C0597-16](https://doi.org/10.1520/C0597-16).
35. ASTM C1585-04, 2016. Standard test method for measurement of rate of absorption of water by hydraulic cement concretes, *ASTM International*, West Conshohocken, PA. doi: [doi.org/10.1520/C1585-20](https://doi.org/10.1520/C1585-20).
36. NT. BUILD 492, 1999. Chloride Migration Coefficient from Non-steady-state Migration Experiments. Nordtest, Finland.
37. Zahedi, M., Ramezani-pour, A.A. and Ramezani-pour, A.M., 2015. Evaluation of the mechanical properties and durability of cement mortars containing nanosilica and rice husk ash under chloride ion penetration. *Construction and Building Materials*, 78, pp. 354-361. doi: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.01.045>.
38. Langaroudi, M.A.M. and Mohammadi, Y., 2018. Effect of nano-clay on workability, mechanical, and durability properties of self-consolidating concrete containing mineral admixtures. *Construction and Building Materials*, 191, pp. 619-634. doi: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.10.044>.
39. Ramezani-pour, A.A., Mortezaei, M. and Mirvalad, S., 2021. Synergic effect of nano-silica and natural pozzolans on transport and mechanical properties of blended cement mortars. *Journal of Building Engineering*, 44:102667. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2021.102667>.
40. Kong, D., Huang, S., Corr, D., Yang, Y. and Shah, S.P., 2018. Whether do nano-particles act as nucleation sites for CSH gel growth during cement hydration? *Cement and Concrete Composites*, 87, pp. 98-109 doi: <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2017.12.007>.
41. Bosiljkov, V.B., 2003. SCC mixes with poorly graded aggregate and high volume of limestone filler. *Cement and Concrete Research*, 33(9), pp. 1279-1286. doi: [https://doi.org/10.1016/S0008-8846\(03\)00013-9](https://doi.org/10.1016/S0008-8846(03)00013-9).
42. Said, A.M., Zeidan, M.S., Bassuoni, M. and Tian, Y., 2012. Properties of concrete incorporating nano-silica. *Construction and Building Materials*, 36, pp. 838-844. doi: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.06.044>.

43. Song, P. and Hwang, S., 2004. Mechanical properties of high-strength steel fiber-reinforced concrete. *Construction and Building Materials*, 18(9), pp. 669-673. doi: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2004.04.027>.
44. Zhao, L., Guo, X., Ge, C., Li, Q., Guo, L., Shu, X. and Liu, J., 2017. Mechanical behavior and toughening mechanism of polycarboxylate superplasticizer modified graphene oxide reinforced cement composites. *Composites Part B: Engineering*, 113, pp. 308-316 doi: <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2017.01.056>.
45. Ye, G., Lura, P., Van Breugel, K. and Fraaij, A., 2004. Study on the development of the microstructure in cement-based materials by means of numerical simulation and ultrasonic pulse velocity measurement. *Cement and Concrete Composites*, 26(5), pp. 491-497. doi: [https://doi.org/10.1016/S0958-9465\(03\)00081-7](https://doi.org/10.1016/S0958-9465(03)00081-7).
46. Whitehurst, E.A., 1951. Soniscope tests concrete structures. in *Journal Proceedings*, 47(2), pp. 433-444.
47. Karahan, O. and Atiş, C.D., 2011. The durability properties of polypropylene fiber reinforced fly ash concrete. *Materials & Design*, 32(2), pp. 1044-1049. doi: <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2010.07.011>.